

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



پاکسازی یک خاک رسی آلوده به ماده دی متیل فتالات با استفاده از روش الکتروکینتیک

مقاله پژوهشی

حسام فتحعلی[۱] علی رئیسی استبرق[۲] کرامت الله رضایی تیره شبانکاره[۳] عبدالحسین هورفر[۴]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79475.1188

چکیده در این کار تحقیقاتی پاکسازی یک خاک رسی آلوده به ماده دی متیل فتالات از روش الکتروکنتیک مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا میزان حداکثر جذب این ماده به وسیله خاک مورد نظر تعیین گردید. پس از آن خاک آلوده با نسبت ۰/۰٤ mg /g تهیه و به دستگاه الکتروکنتیک انتقال یافت. برای افزایش راندمان پاکسازی از محلولهای NaOH و Tween80 در مخزن آند استفاده گردید. علاوه بر آن یک آزمایش با آب مقطر به عنوان آزمایش مرجع هم انجام شد. مقادیر pH و EC مخازن آند و کاتد و حجم آب خروجی از خاک در طول آزمایش اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که در انتهای آزمایش pH در مخزن آند برابر با ٤/۸، ۳/۲۷ و ۲/٦ برای محلولهای NaOH و Tween80 و آب مقطر می‌باشد و حجم مایع خروجی برای NaOH ۱۱٦٥ میلی‌لیتر بود که برای سایر محلولها ۲۰ درصد کمتر از آن بود. مقاومت خاک هم با افزایش فاصله از آند افزایش یافته و مقدار آن در اطراف کاتد ۱٤ کیلوپاسکال برای NaOH حاصل گردید که نسبت به محلولهای آب مقطر و Tween80 به میزان ٥۰ و ٥۷ درصد بیشتر بود. نتایج پاکسازی نشان داد که درصد پاکسازی در کاتد کمتر از آند است. پاکسازی برای Tween80 در اطراف آند و کاتد به ترتیب ٥۳/۸۸ و ۱٦/٦٥ درصد می‌باشد. لیکن برای محلول NaOH این مقادیر به ٥۰/۸۲ و ۲۳/۲٦ درصد می‌رسد. از طرفی برای آب مقطر انباشته شدن آلاینده به میزان ۲۸/۸٥ درصد در کاتد مشاهده می‌گردد. نتایج مشخص نمودند اثر پاکسازی NaOH بیشتر از سایر محلولها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی الکتروکینتیک، خاک رسی، دی متیل فتالات، پاکسازی.

Remediation of A Clay Soil Contaminated With Dimethyl Phthalate By Using Electrokinetic Method

Hesam Fathali Ali Raeesi Estabragh Keramatollah.Rezaei Tireh Shabankareh Abdolhossein Hoorfar

Abstract *In this research work, the remediation of a clay soil contaminated with dimethyl phthalate was studied by using electrokinetic method. Contaminated soil was made with the ratio of 0.04 mg/g. Non-ionic (Tween 80) surfactant and solution of 0.1 M NaOH were used as anolyte. A reference test was also considered with distilled water as anolyte and catholyte. pH and EC and volume of flow out fluid were measured during the tests in both electrode reservoirs. At the end of each test the shear strength, pH, EC and degree of remediation of soil was measured at different distance from anode. The removal of contaminated was measure by a GC (Gas Chromatography) apparatus. The results showed that the amount of flow out fluid for NaOH was nearly 20% more than the solution of Tween 80 and distilled water. The results also indicated that the strength of soil for different solution is increased by increasing the distance from anode. The value of it around the cathode for solution of NaOH was 14 kPa that was about 50 and 57% more than the distilled water and Tween 80. It was found that the degree of remediation at cathode is less than anode. The percentage of remediation for Tween 80 solution around the anode and cathode were 53.88 and 16.5% respectively but for NaOH they changed to 50.82 and 23.26 near anode and cathode reservoir. It was resulted that the effectiveness of NaOH solution in remediation of soil was more than the other used solutions.*

Keyword Electrokinetic, Clay soil, Dimethyl phthalate, Remediation

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/۸/۱٥و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۱۲/۹می‌باشد

(۱) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

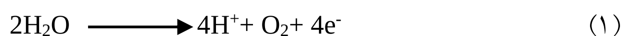
Email: raeesi@ut.ac.ir

(۳) استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

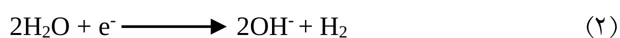
(٤) استاد، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

مقدمه

منشا آلودگیهای زیست‌محیطی، معمولاً آلی یا غیر آلی می‌باشند. آلودگیهای با منشا آلی معمولاً از فعالیتهای صنایع نفت و مجتمعهای پتروشیمی تولید می‌گردند. در طول زمان بهره‌برداری از این صنایع، ترکیبات آلاینده آلی متنوع شامل هیدروکربنهای آلیفاتیک و پلی آروماتیک (PAHs) که دارای ترکیبات سمی می‌باشند وارد محیط و از جمله خاک می‌گردند که موجب آلودگی و خطرات زیست‌محیطی برای انسان و سایر موجودات می‌شوند. بنابراین آنها منشأ خطر بسیار بزرگی جهت آلودگی آبهای زیرزمینی و اکوسیستم محسوب می‌شوند [1]. تاکنون روشهای مختلفی به منظور پاکسازی خاکهای آلوده به مواد آلی و غیرآلی پیشنهاد شده است مانند روش حرارتی، زیست‌محیطی، تثبیت و جامدسازی و الکتروکینتیک. در بین آنها روش الکتروکینتیک دارای راندمان بیشتری به خصوص در پاکسازی خاکهای رسی آلوده با نفوذپذیری کم می‌باشد [2]. در این روش با نصب الکترود در خاکهای آلوده و اعمال جریان مستقیم الکتریسیته موجب جابه‌جایی و انتقال مواد آلاینده در فضای بین ذرات خاک و انتقال آنها به سمت الکترودها و خارج نمودن از محیط می‌شود. این روش تاکنون برای پاکسازی خاکهای آلوده با نفوذپذیری کم به مواد آلاینده آلی همچون هیدروکربنهای نفتی و غیر آلی مانند فلزات سنگین صورت پذیرفته است. حداقل الکترودهای مورد استفاده در این روش دو عدد می‌باشد که یک عدد آن در آند و دیگری در کاتد می‌باشد به طوری که آند دارای بار مثبت و جاذب آلاینده با بار منفی و کاتد دارای بار منفی و جذب کننده آلاینده با بار مثبت می‌باشد. مکانیزمهای اصلی پاکسازی خاکهای آلوده به روش الکتروکینتیک شامل الکترواسمز، الکترومیگریشن، الکتروفورز و الکترولیز می‌باشند [3]. الکترواسمز موجب انتقال آب یا مایع از آند به کاتد می‌شود. در فرایند الکترومیگریشن یونهای موجود در محیط به سمت الکترودهای با بار مخالف به حرکت درمی‌آیند. معمولاً این جابه‌جایی تابعی از غلظت، ظرفیت و قدرت تحرک‌پذیری آنها می‌باشد [4]. در مرحله الکتروفورز، کلوئیدهای باردار به سمت الکترود مشابه حالت الکترومیگریشن حرکت می‌کنند. لیکن این پدیده در خاکهای تراکم یافته اهمیتی ندارد. زیرا از نظر فیزیکی فضاهای تراکم یافته خاک مانع از جابه‌جایی آنها می‌گردد [5]. الکترولیز نیز از جمله فرایندی است که در هنگام اعمال جریان الکتریسیته به وقوع می‌پیوندد به طوری که در آند یون H^+ و گاز اکسیژن و در کاتد یون OH^- و گاز هیدروژن تولید می‌شود. این فرایند سبب تشکیل یک جبهه اسیدی در نزدیکی آند و یک جبهه بازی در نزدیکی کاتد می‌گردد. به طوری که فرایند مذکور به شرح ذیل می‌باشد [3]:



$$2H_2O \longrightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^- \qquad (۱)$$



$$2H_2O + e^- \longrightarrow 2OH^- + H_2 \qquad (۲)$$

که e^- در آن نماد الکترون می‌باشد. ذرات خاکهای رسی حاوی بار منفی می‌باشند. زمانی که آب به خاک اضافه می‌گردد، در اطراف آنها لایه‌ای از آب که حاوی مجموعه‌ای از آنیونها و کاتیونها است تشکیل می‌شوند که لایه مضاعف نامیده می‌شود. با اعمال جریان الکتریسیته در طول پاکسازی خاک، انتقال آب از آند به کاتد صورت می‌پذیرد. حرکت آب در لایه مضاعف تحت این فرایند تحت تأثیر پتانسیل زتا می‌باشد. پتانسیل زتا معمولاً بین بخش ثابت و متحرک این لایه پدید می‌آید [3]. مقدار پتانسیل زتا برای خاکهای رسی اشباع معمولاً منفی می‌باشد و اگر مقدار آن مثبت شود، جهت جریان مایع برعکس می‌شود و از کاتد به آند خواهد بود [6].

اولین کاربرد این روش را می‌توان در خصوص انتقال املاح و همچنین مواد قلیایی از خاک و پاکسازی آن از این مواد نام برد [7]. کاربرد این روش برای پاکسازی خاک آلوده به فلزات سنگین به اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی برمی‌گردد [8]. محققانی همچون سگال و همکاران [9] و لاگمن و همکاران [10] با انجام آزمایشهای مختلف به این نتیجه دست یافتند که این روش پتانسیل پاکسازی خاکهای آلوده به آلاینده‌های آلی از جمله هیدروکربنهای آروماتیک را هم داراست. پس از آن تحقیقات گسترده‌ای به وسیله محققانی همچون بروئل و همکاران [11]، پاماکو و وایت [12] و آکار و همکاران [2] در خصوص پاکسازی خاک آلوده به مواد آلاینده مختلفی انجام گردید. آنها نتیجه‌گیری کردند که فرایند پاکسازی به وسیله این روش مطلوب و قابل قبول می‌باشد. اخیراً به منظور افزایش درجه پاکسازی خاک از مواد آلی آلاینده غیرقطبی استفاده از محلولهای پاک کننده جهت افزایش میزان مایع خروجی از محیط آلوده پیشنهاد شده است [13]. محققان دیگری مانند آکار و الشاویکه [14] و لانسلوت و همکاران [15]، استفاده از سورفکتنتها را برای افزایش پاکسازی آلاینده‌های آلی مانند هیدروکربنهای نفتی و هگزاکلروبوتادین پیشنهاد کرده‌اند. سایچک و ردی [16]، آلکانترا و همکاران [17] و هان و

همکاران [18] پاکسازی یک خاک رسی آلوده به فنانترن را با استفاده از روش الکتروکنتیک و با مواد حلال کمکی انجام دادند و نتایج قابل قبولی گزارش کردند. محققان دیگری همچون ما و همکاران [19]، استبرق و همکاران [20]، وی و همکاران [21] و استبرق و همکاران [22] با انجام آزمایشهای مختلف نتیجه‌گیری کردند که برای افزایش کارایی روش الکتروکینتیک استفاده از سورفکتنتها ضروری می‌باشد. محققانی مانند لی و جیانگ [23]، فردین و همکاران [24]، بیابانکی و همکاران [25] و جیدودو و همکاران [26] با استفاده از روش الکتروکنتیک اقدام به پاکسازی خاک آلوده به نفت و گازوئیل نمودند و دریافتند که این روش در پاکسازی مواد آلاینده آلی بسیار مؤثر است.

هدف تحقیق

دی متیل فتالات از مواد شیمیایی آلی می‌باشد که در صنایع مختلفی مانند تولید رنگ، پلاستیک، سموم کشاورزی و... کاربرد فراوان دارد. بر اساس گستردگی کاربرد آن، آلودگی زیست‌محیطی را تولید می‌نماید که برای سلامت انسان بسیار مضر است. سازمانهای ملی و بین‌المللی این ماده را از گروه مواد آلاینده پرخطر برای محیط زیست و سلامت انسان اعلام نموده‌اند [27]. یانگ و همکاران [28] گزارش نمودند که این آلاینده در اکثر رسوبات موجود در سرتاسر جهان یافت می‌شود. مصطفی‌لو و همکاران [29] نیز گزارشهایی مبنی بر وجود دی متیل فتالات در رسوبات تالاب انزلی ارائه کردند. بنابراین برای حفاظت از محیط زیست و منابع آب و در نهایت چرخه زندگی انسان پاکسازی خاکهای آلوده به این ماده امری ضروری به نظر می‌رسد. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقاتی در خصوص پاکسازی خاکهای رسی آلوده به آن از روش الکتروکینتیک انجام نگرفته است. در این کار تحقیقاتی در ابتدا میزان جذب این ماده به وسیله یک خاک رسی تعیین گردید. سپس با توجه به نتایج جذب، پاکسازی آن به روش الکتروکنتیک در حالت معمولی (مخازن آند و کاتد پرشده از آب مقطر)، شرایط افزودن محلول ۰/۱ مولار سدیم هیدروکسید (NaOH) و محلول ۳ درصد سورفکتنت تویین ۸۰ (Tween80) در مخزن آند مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده در حالات مختلف در خصوص میزان پاکسازی و تغییرات پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مقایسه قرار گرفت و در مورد آنها بحث کافی صورت پذیرفت.

مواد و روشها

مواد مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از خاک، دی متیل فتالات، آب، سدیم هیدرکسید و توبین ۸۰ که در مورد خصوصیات و خواص هر کدام از آنها به طور مختصر به شرح زیر توضیح داده می‌شود.

خاک مورد استفاده. در این پژوهش از یک خاک رسی که تحت عنوان کائولینیت تلقی می‌گردید، استفاده شد. این خاک مشابه خاکهایی است که قبلاً در تحقیقات به روش الکتروکنتیک مورد استفاده محققان دیگر قرار گرفته است [6]. خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مطابق استاندارد ASTM تعیین شدند. نتایج حدود آتربرگ نشان داد که حدود روانی و خمیری این خاک معادل ٤٨ و ٢٥ درصد می‌باشند. بر اساس نتیجه دانه‌بندی مشخص شد که این خاک متشکل از ۲ درصد ماسه، ٤٥ درصد سیلت و ٥٣ درصد رس است. مقدار Gs آن نیز معادل ۲/٧٤ تعیین گردید. مطابق سامانه طبقه‌بندی یونیفاید این خاک از نوع رسی با پلاستیسیته کم (CL) طبقه‌بندی شد. آزمایش تراکم استاندارد هم نشان داد که رطوبت بهینه (W_{opt}) و وزن واحد حجم ماکزیمم (γd_{max}) آن برابر با ۱۷/۹ درصد و KN/m^3 ۱۷/۷۱ است. جدول (۱) نیز خواص شیمیایی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱ پارامترهای شیمیایی خاک مورد بررسی

PH	۸
EC (ms/cm)	۰/۰۱۰۷
Ca^{2+} (meq/L)	٢٤
K^+ (meq/L)	۰/۳۳
Cl^- (meq/L)	٦۰
SO_4^{2-} (meq/L)	۸۳
CO_3^{2-} (meq/L)	۰/٦
$CaCO_3$ (%)	۱۰/۲
Mg^{2+} (meq/L)	۱۰
OC* (%)	۰/۱۱

*Organic Content

آلاینده مورد بررسی. آلاینده دی متیل فتالات با فرمول شیمیایی $C_{10}H_{10}O_4$ که از گروه استرهای فتالاتی بوده مورد

بررسی در این پژوهش می‌باشد. استرهای فتالات (PAEs) نام رایج دی الکیل یا دی آلکیل اریل استر فتالیک اسید است که در تهیه موادی مانند چسبها، رنگها، لوازم بازی کودکان، واکسها، صنایع کاغذ و مقواسازی، ترکیبات دارویی، حشره‌کشها و دفع آفات به کار می‌روند. همچنین از این ماده به عنوان نرم‌کننده در لوازم پلاستیکی استفاده می‌شود. این ماده از شرکت مرک آلمان تهیه گردید و بر اساس اطلاعات اخذ شده از تولید کننده این ماده آلی به صورت مایعی بی رنگ به جرم مولکولی ۱۹٤/۱۸ گرم بر مول و دانسیته ۱/۱۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. نقطه ذوب و جوش و میزان حلالیت آن در آب به ترتیب برابر با ۲ و ۲۸٤ سانتی‌گراد و ٤۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است.

آب مورد استفاده. آب مورد استفاده در این پژوهش جهت پاکسازی خاک آلوده، آب مقطر انتخاب گردید و pH آن ۷ و میزان EC آن برابر با ۰/۰۰٦۷ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد. علت استفاده از آب مقطر به این علت بود که اثر وجود یونهای طبیعی در کارایی آزمایش الکتروکنتیک به حداقل برسد و نتایج حاصل شده مستقل از اثر یونهای موجود در آن باشد.

سدیم هیدروکسید (NaOH). سدیم هیدروکسید ماده جامد سفید رنگ با فرمول شیمیایی NaOH، یک باز قوی می‌باشد و از شرکت نوترون شیمی تهیه گشته است. این ماده به راحتی در آب قابل حل می‌باشد و پس از ترکیب با آب گرمای قابل توجهی تولید می کند. همان طور که قبلاً بیان گردید، در مخزن آند به علت تولید یون H^+، محیط اسیدی می‌شود. اسیدی شدن محیط سبب کاهش پتانسیل زتا (از لحاظ جبری) و در نتیجه کاهش سرعت جریان الکترواسمزی می‌شود. به همین علت پژوهشگران بسیاری حین فرایند الکتروکنتیک از یک ماده کنترل‌کننده pH استفاده می‌کنند. در این پژوهش نیز از محلول سدیم هیدروکسید ۰/۱ مولار مشابه پژوهش جئون و همکاران استفاده گردید [30].

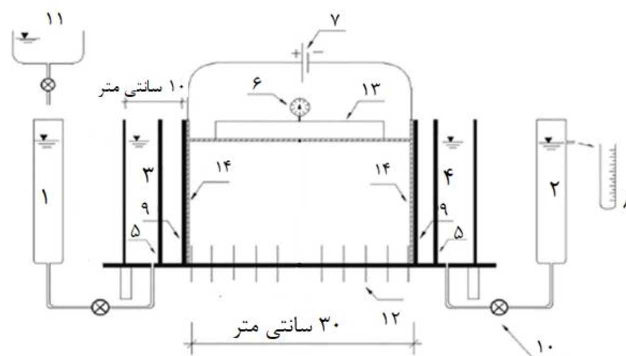
Tween80. تویین ۸۰ (Tween80) یک سورفکتنت شیمیایی غیر یونی با فرمول $C_{64}H_{124}O_{26}$ می‌باشد که از شرکت مرک آلمان تهیه گردید. سورفکتنتهای غیر یونی و آنیونی به علت کارایی بالاتر و جذب کمتر توسط خاک توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق از محلول ۳ درصد Tween80 به علت تجزیه‌پذیری در محیط زیست و درجه سمیت کم ماده در مخزن آند استفاده گردید [31]. تعدادی از محققان از جمله فردین و همکاران به منظور افزایش کارایی روش الکتروکینتیک از آن استفاده کردند [24].

دستگاه مورد استفاده. دستگاه الکتروکنتیک موجود در آزمایشگاه برای انجام این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت و مقطعی از آن در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد این دستگاه متشکل از یک محفظه اصلی مکعب مستطیلی شکل به ابعاد ۱۰*۳۰*۳۰ سانتی‌متر ساخته شده از پلکسی به ضخامت ۱ سانتی‌متر می‌باشد که به محفظه اصلی موسوم است. در دو طرف آن دو مخزن که تحت عنوان مخازن آند و کاتد نامیده می‌شود تعبیه شده است. درون این مخازن صفحات فولادی مشبکی که آند و کاتد می‌باشد، قرار دارند. جنس این صفحات از فولاد ضد زنگ می‌باشد. همچنین با استفاده از متعلقات جانبی دیگر سطح مایع در داخل این دو مخزن قابل کنترل است. در قسمت بالای محفظه اصلی دستگاه یک صفحه فلزی قرار دارد. از طریق این صفحه بار لازم به خاک موجود در محفظه اصلی دستگاه اعمال می‌گردد. بالای این صفحه یک گیج قرار دارد. تغییر شکل خاک در زمانهای مختلف به وسیله قرائت گیج امکان‌پذیر است. در کف محفظه اصلی این دستگاه تعدادی پروب از جنس مس که یک رسانای قوی است نصب شده است. این پروبهای مسی اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی در طول نمونه خاک در حین انجام آزمایش را امکان‌پذیر می‌کنند.

روش انجام آزمایش

آزمایشهای مورد نظر در این کار به دو گروه الف) آزمایش جذب و ب) آزمایشهای اصلی تقسیم می‌شوند که در ادامه توضیح داده می‌شوند:

الف) آزمایش جذب. بر اساس پیشنهاد هانتر و همکاران در سال ۲۰۰۰، محلول کلسیم کلرید ۰/۰۰۵ مولار برای تعیین مقدار جذب مورد استفاده قرار گرفت [32]. محلولهایی با حجم حلال ۱۲۰ میلی‌لیتر و با غلظتهای مختلف از آلاینده ساخته شد و با ۵ گرم خاک خشک (با نسبت محلول/۲٤ خاک۱) به مدت ٤۸ ساعت با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه توسط همزن برقی مخلوط گردید.



شکل ۱ دستگاه مورد استفاده در آزمایش الکتروکینتیک

که در آن به ترتیب :

۱) مخزن تغذیه ۲) مخزن تخلیه ۳) مخزن آند
۴) مخزن کاتد ۵) الکترودها ٦) گیج اندازه‌گیری نشست
۷) منبع تغذیه ۸) مخزن مدرج اندازه‌گیری جریان خروجی ۹) صفحه متخلخل
۱۰) شیر ۱۱) مخزن ورودی ۱۲) پروبهای اندازه‌گیری ولتاژ
۱۳) صفحه بارگذاری شده ۱٤) ژئوتکستایل

پس از آن مخلوط در محل ثابت قرار داده شد و پس از ته‌نشین شدن ذرات جامد از قسمت فوقانی آن اقدام به اخذ نمونه به حجم ۱۰ میلی‌لیتر گردید. نمونه برداشت شده با ۱۰ میلی‌لیتر هگزان نرمال مخلوط و به مدت ۳ دقیقه در دستگاه لرزه قرار داده شد. سپس نمونه‌ها به دستگاه کروماتوگرام گازی (GC) تزریق گشت و با استفاده از رابطه (۳) میزان جذب آلاینده به وسیله خاک تعیین گردید [3].

$$q = \frac{(C_i - C_e)V}{M} \qquad (۳)$$

که در آن q میزان جذب آلاینده به وسیله خاک (mg/g)، C_i میزان غلظت اولیه آلاینده در محلول (mg/l)، C_e میزان غلظت باقی مانده آلاینده در محلول (mg/l)، V و M به ترتیب حجم حلال مورد استفاده (l) و جرم خاک (g) می‌باشد. بنابراین آزمایشهای متعددی با غلظتهای مختلف محلول صورت پذیرفت و اقدام به محاسبه میزان جذب با استفاده از رابطه (۳) گردید. در نتیجه حداکثر جذب دی متیل فتالات توسط خاک رسی موجود برابر با ۰/۰۸۷ mg/g تعیین شد و بر همین اساس میزان ۰/۰٤ mg/g به عنوان غلظت آلاینده در آزمایش الکتروکنتیک مورد استفاده قرار گرفت.

ب) آزمایش‌های اصلی . برای انجام آزمایشهای اصلی نیز مراحل زیر صورت پذیرفت:

تهیه نمونه خاک. به منظور تهیه نمونه خاک آلوده، ابتدا ۳٦۰ میلی‌گرم دی متیل فتالات با ۱۸۰۰ میلی‌لیتر آب مخلوط گردید و با درپوش به مدت یک روز در محل بی حرکت قرار داده شد تا مکانیزم حل به صورت کامل صورت پذیرد. سپس این مجموعه با ۹ کیلوگرم خاک خشک رسی به طور اسپری مخلوط گردید. این مخلوط به مدت ۳٦ ساعت در یک ظرف دارای درب نگهداری شد تا واکنشهای شیمیایی لازم بین آلاینده و خاک رخ دهد و نیز توزیع یکنواخت آلاینده صورت بپذیرد. سپس این مخلوط با استفاده از ۳۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به رطوبت بیشتر از رطوبت حد روانی رسید و به طور کامل مخلوط شد. سپس به مدت پنج روز مخلوط آب و خاک و آلاینده در ظرف فلزی پوشیده شده با درپوش نگهداری شد تا توزیع یکنواخت رطوبت صورت پذیرد. سپس مخلوط مذکور به بخش اصلی دستگاه الکتروکنتیک انتقال پیدا کرد. تعداد آزمایشهای مورد نظر در جدول (٤) آورده شده است. در آزمایش نخست، مخازن آند و کاتد دو طرف خاک با آب مقطر پر گردیدند. همچنین سطح آب در دو طرف خاک تنظیم شد تا از پدید آمدن جریان ناشی از بار هیدرولیکی جلوگیری به عمل آید. سپس بر روی نمونه داخل محفظه سرباری به میزان ۱ کیلوپاسکال قرار داده شد تا به خاک اعمال گردد و متعاقب آن

نشست خاک شروع گردید [22]. این روند تا هفت روز به طول انجامید و مقدار نشست خاک روزانه توسط گیج اندازه‌گیری و ثبت گردید. این آزمایش در دو تکرار دیگر با تغییر مایع درون مخرن آند هم انجام شد. در آزمایش شماره (۲) در مخزن آند محلول ۰/۱ مولار سدیم هیدروکسید و در آزمایش شماره (۳) مخزن آند توسط محلول ۳ درصد توبین ۸۰ مطابق جدول (۲) پر گردید. در تمامی آزمایشها مخزن کاتد از آب مقطر پر گردید. سپس در ادامه جریان الکتریسیته مستقیم به شدت ۵۰ ولت مطابق پیشنهاد میچل و سوگا توسط منبع تغذیه به مخازن آنولیت و کاتولیت اعمال گردید [33].

جدول ۲ لیست آزمایشهای انجام شده

شماره آزمایش	آنولیت	کاتولیت
۱	آب مقطر	آب مقطر
۲	محلول ۰/۱ مولار NaOH	آب مقطر
۳	محلول ۳٪ توبین ۸۰	آب مقطر

در مراحل اولیه پس از اعمال جریان الکتریسیته در زمانهای ۰، ۰/۵ ساعت، ۱ ساعت و ۲ ساعت میزان شدت جریان در نزدیک آند و اختلاف پتانسیل در پروبهای مسی موجود در کف محفظه اصلی دستگاه، میزان نشست و میزان حجم مایع خروجی اندازه‌گیری شد و مقادیر pH و EC (هدایت الکتریکی) مخازن آنولیت و کاتولیت ثبت شد. این عمل تا پایان هر آزمایش که هفت روز بود، ادامه یافت.

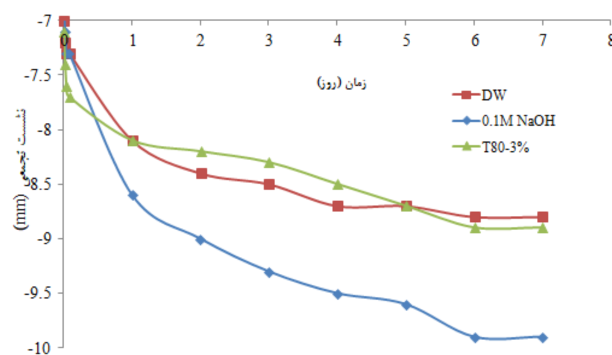
آزمایش آبشویی. پس از انجام آزمایش، اتصالات مربوط از دستگاه اصلی جدا گردید. بخش بالای سطح خاک حذف شد. به طوری که از لایه وسط از فواصل ٤، ۱۲، ۱۹ و ۲٦ سانتی‌متری از آند اقدام به برداشت نمونه گردید. نمونه‌ها در هوای آزاد خشک شدند و سپس نرم و از الک نمره ۱۰ عبور داده شدند. مراحل تهیه نمونه لازم جهت تزریق به دستگاه GC مطابق استاندارد EPA8061-A (1996) انجام گردید به طوری که از خاک الک شده ۱۰ گرم انتخاب و با ۱۵ میلی‌لیتر هگزان و ۱۵ میلی‌لیتر استون (نسبت 1:1) اختلاط یافت [34]. مخلوط مذکور به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه لرزه قرار گرفت و سپس در دستگاه اولتراسونیک تحت ماکزیمم قدرت خود قرار داده شد.

پس از آن به طور مجدد به دستگاه لرزش انتقال یافت که طول مدت آن نیز ۱۰ دقیقه بود. پس از آن ۱۰ میلی‌لیتر از بالای هر نمونه توسط پیپت برداشت گردید و به این مجموعه ۲ گرم نمک سولفات سدیم افزوده شد. علت افزودن نمک سولفات سدیم آن بود که تمامی آب و رطوبت باقی مانده در محلول حذف شود؛ زیرا ورود آب به دستگاه GC سبب آسیب رساندن به آن می‌گردید. سپس ترکیب فوق را به مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۳۵۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ و سپس به ویالهایی مخصوص جهت تزریق به دستگاه GC منتقل گردید. به منظور تعیین غلظت نیز چند نمونه دی متیل فتالات با غلظت‌های مشخص به دستگاه تزریق گردید تا بر اساس آن بتوان رابطه بین غلظت و سطح زیر پیک در نمونه‌های خاک پاکسازی شده تعیین گردد.

آزمایشهای فیزیکی و مکانیکی. بعد از انجام آزمایش و برداشت و حذف لایه بالایی روی خاک در داخل محفظه، در لایه وسط از نقاط مختلف با فواصل مشخص از آند اقدام به تعیین مقاومت برشی خاک با استفاده از دستگاه برش پره شد و سپس از همان فواصل از آند اقدام به اخذ نمونه جهت تعیین pH و EC خاک گردید. آزمایشهای مذکور بر اساس استانداردهای ASTM صورت پذیرفت. در ادامه به ترتیب نتایج حاصل شده از میزان نشست، pH و EC مخازن آند و کاتد، حجم آب خروجی روزانه، ضریب الکترواسمزی، شدت جریان در آند و مقاومت برشی در پایان هر آزمایش ارائه شده است. همچنین pH و EC خاک و درصد آلاینده باقی مانده در فواصل مشخص آند آورده شده است و در رابطه با آنها بحث کافی صورت می‌پذیرد.

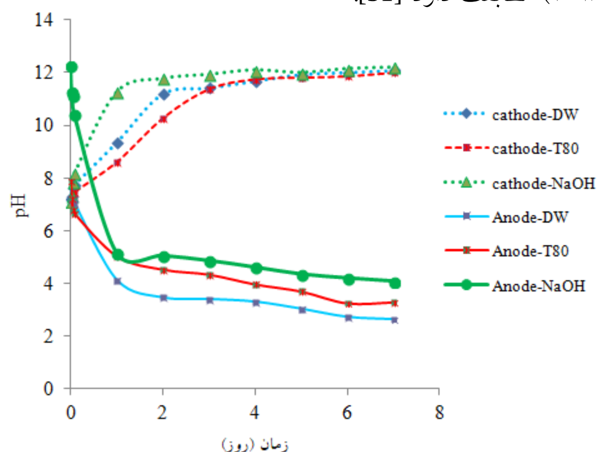
نشست. شکل شماره (۲) تغییرات نشست را با زمان برای ۳ آزمایش نشان می‌دهد. پس از نشست ناشی از سربار (بدون اعمال جریان الکتریسیته)، این شکل نشست تحت اثر اعمال جریان الکتریسیته را نشان می‌دهد. از این شکل نتیجه‌گیری می‌شود که سرعت افزایش نشست در زمان اولیه انجام آزمایشها برای هر سه محلول زیاد است. پس از آن از شدت این تغییرات مخصوصاً برای Tween80 و آب مقطر کاسته می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد به طور کلی نشست ناشی از محلول NaOH به

اندازه ۱۱/۲۳ و ۱۲/۵ درصد بیشتر از Tween80 و آب مقطر است. علت این امر را می‌توان اینگونه بیان نمود که وجود Na^{+} در محلول NaOH پس از ورود به خاک، سبب فولوکوله شدن ساختار خاک شده و در نتیجه باعث می‌شود میزان نشست خاک نسبت به دو آزمایش دیگر بیشتر باشد.



شکل ۲ نشست ناشی از جریان الکتریسیته در آزمایشهای مختلف (DW = آب مقطر و T80 = تویین ۸۰)

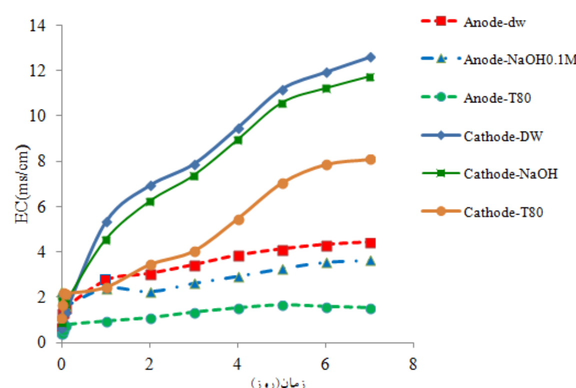
تغییرات pH مقادیر pH اندازه‌گیری شده در طول اجرای هر آزمایش در مخازن آند و کاتد برای محلولهای مختلف مورد استفاده در شکل شماره (۳) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد مقادیر pH در آند دارای روند کاهشی نسبت به مقدار اولیه خود هستند و موجب اسیدی شدن محیط و تولید جبهه اسیدی در اطراف آند می‌شوند. مقادیر آن در انتهای آزمایش در مخزن آند برابر با ٤/٠٨، ۳/۲۷ و ۲/٦۸ برای محلولهای NaOH، Tween80 و آب مقطر می‌باشد، به طوری که میزان کاهش در مقدار pH نسبت به NaOH، برای Tween80 و آب مقطر معادل ۱۹/۸۵و ۳٥/۸ درصد می‌باشد. این داده‌ها نشان دهنده آن است که آب مقطر در ایجاد جبهه اسیدی اثر بیشتری نسبت به محلولهای دیگر دارد. این شکل تغییرات مقدار pH در کاتد جهت زمانهای مختلف برای محلولهای مختلف را نیز نشان می‌دهد. همان طوری که ملاحظه می‌گردد مقادیر pH برای محلولهای مورد استفاده روند افزایش را نسبت به مقادیر اولیه خود دارند. سرعت این تغییرات افزایش در روزهای اولیه آزمایش (معمولاً ۲ روز اولیه) برای محلولهای مختلف مخصوصاً NaOH زیاد است. پس از آن این تغییرات با سرعت کمتری برخوردار است. در انتهای آزمایشها مقادیر pH معادل ۱۲/۰۹، ۱۲ و ۱۲/۲ برای آب مقطر، Tween80 و NaOH اندازه‌گیری شده است. این نتایج بیانگر آن است که محلول NaOH در ایجاد جبهه قلیایی از سرعت بیشتری نسبت به محلولهای دیگر برخوردار است. این نتایج با پژوهشهای محققان بسیاری از جمله استبرق و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد [31].



شکل ۳ تغییرات pH در مخازن آند و کاتددر آزمایشهای مختلف

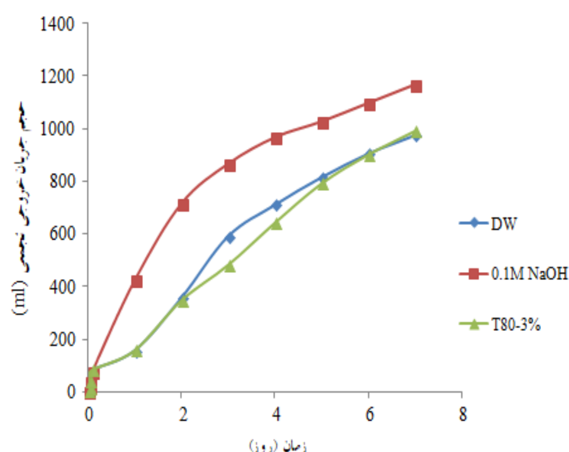
تغییرات EC شکل (٤) تغییرات EC اندازه‌گیری شده در مخازن آند و کاتد برای محلولهای مورد استفاده را در زمانهای مختلف نشان می‌دهد. همان طوری که در این شکل ملاحظه می‌گردد مقدار EC با گذشت زمان در مخزن آند برای محلولهای مختلف نسبت به مقدار اولیه آن افزایش می‌یابد. لیکن این افزایش برای محلولهای مختلف یکسان نمی‌باشد. در انتهای آزمایش مقدار آن برای آب مقطر ٤/٤۲ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و برای NaOH و Tween80 مقدار آن معادل ۱۸/۱ و ٦٥ درصد نسبت به آب مقطر کاهش می‌یابد. این اطلاعات نشان می‌دهد که مقدار EC برای Tween80 کمتر از سایر محلولهای مورد استفاده می‌باشد. بنابراین تغییرات مقدار EC به نوع محلول مورد استفاده بستگی دارد. شکل شماره (٤) تغییرات مقدار EC را در کاتد نیز نشان می‌دهد، به طوری که روند تغییرات آن مشابه تغییرات در آند است. لیکن سرعت تغییرات نسبت به آند بسیار زیاد است. به طوری که دسته منحنیهای مربوط به تغییرات آن در کاتد در قسمت بالای دسته منحنیهای مربوط به آند قرار دارند. همان طوری که ملاحظه می‌گردد مقادیر EC در کاتد برای آب مقطر در انتهای آزمایش ۱۲/٦۱ و برای NaOH و Tween80 معادل ۱۱/۷٥ و ۸/۱ میلی-زیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد. به عبارتی کاهش آنها ٦/۸۲ و ۳٥/۷٦ درصد نسبت به آب مقطر است. به هر حال نتایج نشان

می‌دهد که مقادیر EC برای یک محلول مشخص در کاتد بیشتر از آند است. همان طوری که بیان گردید، اثر Tween80 در کاهش EC در مخزن کاتد نسبت به محلولهای دیگر بسیار زیاد است. می‌توان گفت که Tween80 یک ماده غیر یونی است و موجب واکنش خاصی نمی‌شود اما امکان دارد تعدادی از یونهای آزاد شده را در شبکه خود نگهداری کند که در کاهش EC مؤثر است. کاهش EC با استفاده از محلول NaOH هم مشاهده می‌گردد که علت آن ناشی از آن می‌باشد که یونهای OH^- تولید شده با سایر یونهای آزاد در محیط ممکن است تولید نمک کند که در کاهش تعداد یونها و نیز EC مؤثر است. در کاتد مقدار EC مربوط به آب مقطر بیشتر از سایر آزمایشها است زیرا بسیاری از یونهای آزاد در فضای بین ذرات و همین طور یونهای ناشی از نمکهای موجود در خاک به سمت کاتد مهاجرت نموده و باعث افزایش EC نسبت به آزمایشهای دیگر می‌شود.



شکل ٤ تغییرات EC در مخازن آند و کاتد در آزمایشهای مختلف

تغییرات حجم مایع خروجی. تغییرات حجم مایع خروجی از توده خاک آلوده برای محلولهای مختلف مورد استفاده در شکل شماره (٥) نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌گردد حجم مایع خروجی برای هر سه محلول مورد استفاده در روزهای اولیه آزمایش زیاد می‌باشد. لیکن با گذشت زمان در مقدار آن کاهش روی می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که حجم مایع خروجی برای محلول NaOH معادل ١١٦٥ میلی‌لیتر و برای محلول Tween80 و آب مقطر برابر با ٩٩٠ و ٩٧٥ میلی‌لیتر اندازه‌گیری شده است که کاهشی حدود ٢٠درصد نسبت به NaOH را نشان می‌دهد. علت افزایش حجم مایع خروجی با استفاده از محلول NaOH ناشی از آن است که یون Na^+ تولید شده ممکن است ساختار خاک را تغییر دهد و به حالت فولوکوله با فضاهای نسبتاً بزرگی تبدیل نماید که در نتیجه خروج مایع از فضای بین ذرات به آسانی صورت می‌پذیرد و در مورد سایر آزمایشها شاید تغییرات قابل توجهی بر روی ساختار خاک روی ندهد و حجم مایع خروجی نسبت به محلول NaOH کمتر است.



شکل ٥ حجم جریان خروجی در آزمایشهای مختلف

تغییرات ضریب الکترواسمز (K_0). با توجه به اطلاعات ثبت شده، میزان ضریب الکترواسمزی توده خاک در زمانهای مختلف با استفاده از رابطه (٤) محاسبه گردید [33]:

$$K_0 = \frac{A\Delta V_e}{QL} \qquad (٤)$$

که در آن

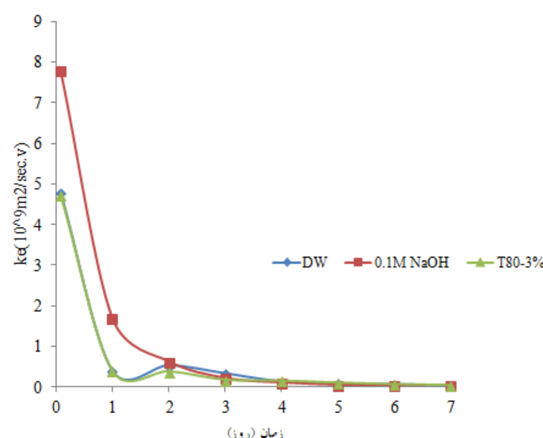
K_0 ضریب الکترواسمزی خاک بر حسب $m^2/sec.v$، A سطح مقطع عبوری جریان بر حسب مترمربع (m^2)، L طول نمونه خاک برحسب متر (m) و Q دبی عبوری جریان برحسب m^3/sec می‌باشد. ΔV_e اختلاف پتانسیل الکتریکی مؤثر بوده که مطابق رابطه ذیل محاسبه می‌شود [35]:

$$\Delta V_e = \Delta V - (\Delta V_C + \Delta V_A) \qquad (٥)$$

که در آن

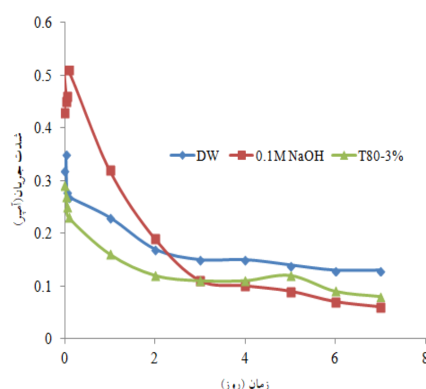
ΔV اختلاف پتانسیل اعمال شده بر حسب ولت، ΔV_C پتانسیل ایجاد شده در مجاورت کاتد و ΔV_A پتانسیل ایجاد شده در مجاورت آند می‌باشد. مقادیر آنها توسط پروبهای موجود در کف دستگاه اندازه‌گیری شدند. همان طور که بیان شد K_0

ضریب الکترواسمز می‌باشد که میزان مایع خروجی از نمونه را نشان می‌دهد و مانند ضریب هدایت هیدرولیکی برای ارزیابی مقدار عبوری جریان آب در داخل توده خاک استفاده می‌شود. همان طوری که در شکل شماره (٦) مشاهده می‌گردد، مقادیر اولیه K_0 برای محلولهای NaOH و Tween80 و آب مقطر معادل ۷/۸، ٤/۷۳ و ٤/۷۹ $\times 10^{-9}$ $m^2/sec.v$ می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد که مقدار K_0 اولیه برای NaOH بسیار بیشتر از دو محلول دیگر است. با گذشت زمان یک افت شدید در مقادیر آنها مشاهده می‌شود. به طوری که پس از گذشت زمان یک روز از زمان آزمایش مقادیر آنها برای NaOH، Tween80 و آب مقطر معادل ۱/٦۸، ۰/٤۱ و ۰/۳۹ $\times 10^{-9}$ $m^2/sec.v$ می‌گردد. نتیجه‌گیری می‌گردد که مقدار K_0 مربوط به NaOH مقدار بیشتری نسبت به دو محلول دیگر دارد. لیکن با گذشت زمان از تغییرات آنها کاسته می‌شود و به ترتیب به مقدار $10^{-9}\times$ $m^2/sec.v$ ۰/۰٤۲، ۰/۰۵۰ و ۰/۰٤۱ برای محلولهای مذکور می‌رسد. در زمان و ولتاژ ثابت حجم مایع خروجی از نمونه بستگی به K_0 دارد. همان طور که از شکل شماره (٦) مشخص است، K_0 برای دو آزمایش آب مقطر و Tween80 تقریباً یکسان است.



شکل ٦ ضریب الکترواسمزی در آزمایشهای مختلف

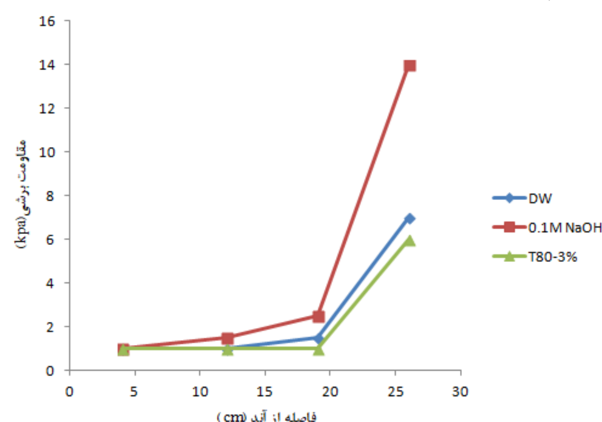
تغییرات شدت جریان. هنگام اجرای آزمایشهای اصلی شدت جریان الکتریکی اعمال شده در دستگاه نیز اندازه‌گیری گردید و نتایج آن در شکل شماره (۷) نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود شدت جریان اولیه دارای مقدار حداکثری معادل ۰/۵۱، ۰/۳۵ و ۰/۲۹ آمپر برای محلولهای NaOH، آب مقطر و Tween80 می‌باشد. با گذشت زمان اولیه افت شدیدی در مقادیر اولیه آنها دیده می‌شود. پس از آن با افزایش زمان مقدار افت در مقادیر آنها روند کاهشی دارد. به طوری که برای آب مقطر و Tween80 بعد از سپری شدن سه روز از زمان آزمایش مقادیر آنها به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسد. لیکن برای محلول NaOH در طول این مدت افت کمی در شدت جریان مشاهده می‌شود. علت آن است که NaOH به Na^+ و OH^- تجزیه می‌شوند. همان طور که بیان شد OH^- تعدادی از یونهای H^+ را خنثی می‌کند و Na^+ تحت فرایند الکترومیگریشن به سمت کاتد حرکت می‌کند و موجب افزایش جریان نسبت به دو آزمایش دیگر می‌شود. همان طور که مشهود است، Tween80 دارای شدت جریان کمتری نسبت به آزمایش با آب مقطر به علت غیریونی بودن می‌باشد. در انتها کاهش شدت جریان برای Tween80 و NaOH بیشتر از آب مقطر است. زیرا یونهای مهاجرت کرده به کاتد ممکن است تولید نمک و یا ترکیبات شیمیایی خاصی نمایند که سبب ایجاد مقاومت در برابر عبور جریان می‌شود.



شکل ۷ شدت جریان در آند در آزمایشهای مختلف

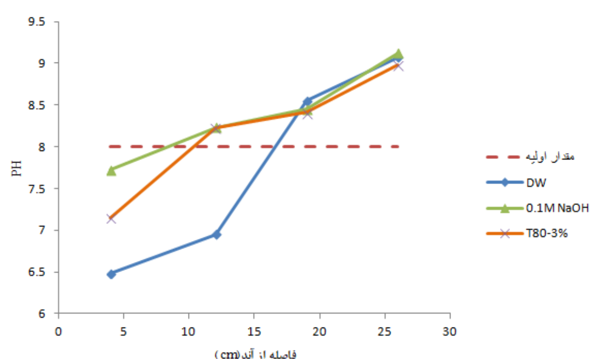
مقاومت برشی زهکشی نشده. پس از انجام هر آزمایش مقاومت برشی خاک در فواصل ٤، ۱۲، ۱۹ و ۲٦ سانتی‌متر در طول نمونه از آند مطابق استاندارد ASTM اندازه‌گیری گردید. شکل (۸) نتایج آن را برای محلولهای مختلف نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از آند مقاومت خاک برای محلولهای مختلف افزایش می‌یابد. مقاومت برای آنها در فاصله ۲٦ سانتی‌متری از آند یا در مجاورت کاتد به حداکثر خود می‌رسد. برای محلول NaOH مقاومت در فواصل ٤، ۱۲، ۱۹ و ۲٦ سانتی‌متری معادل ۱، ۱/۵، ۲/۵ و ۱٤ کیلوپاسکال است. مشابه این روند تغییرات برای سایر محلولها

مشاهده می‌شود. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده مقاومت برای محلول NaOH در مجاورت کاتد ۱۴ کیلوپاسکال است که نسبت به محلولهای آب مقطر و Tween80 دارای افزایش معادل ۵۰ و ۵۷ درصد می‌باشد. محققانی همچون ریتیرونگ و همکاران [35] و استبرق و همکاران [36] نتایجی مشابه نتایج به دست آمده برای مقاومت برشی ارائه دادند. آنها علت افزایش مقاومت در مجاورت کاتد را ناشی از مهاجرت یک سری از یونهای تولید شده از آند به سمت کاتد ذکر کرده‌اند که در حوالی کاتد به علت جبهه قلیایی با سایر یونها و املاح واکنش شیمیایی انجام می‌دهند و تولید مواد سیمانته کننده می‌نمایند که در چسباندن ذرات به یکدیگر و افزایش مقاومت تأثیرگذار هستند.



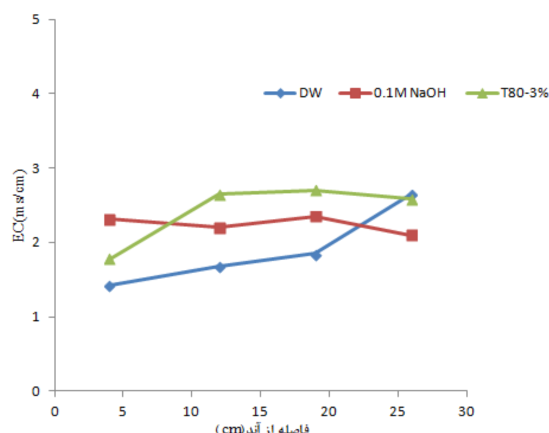
شکل ۸ مقاومت برشی در پایان آزمایشهای مختلف

pH خاک. پس از اندازه‌گیری مقاومت برشی از نقاط مذکور خاک پاکسازی شده اقدام به اخذ نمونه گردید و نمونه‌ها در محیط طبیعی به مدت ۱۰ روز جهت خشک شدن در هوای آزاد نگهداری و پس از آن نرم شدند. ۱۰ گرم خاک رد شده از الک نمره ۱۰ با ۱۰ میلی‌لیتر آب مخلوط گردید و به مدت ۳ ساعت نگهداری شدند تا به تعادل برسند. سپس مقادیر pH برای نمونه‌ها در فواصل ٤، ۱۲، ۱۹ و ۲٦ سانتی‌متری از آند در طول نمونه خاک تعیین گردید. شکل شماره (۹) تغییرات pH را در طول نمونه خاک برای محلولهای مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد در ابتدای نمونه خاک (مجاورت آند) جبهه اسیدی حاکم است. لیکن شدت و درجه آن بستگی به نوع محلول مورد استفاده دارد. در فاصله ٤ سانتی‌متری از آند، مقادیر آن برای آب مقطر، محلول NaOH و Tween80 معادل ٦/٤٨، ۷/۱۵ و ۷/۷۲ است. با افزایش فاصله از آند از شدت جبهه اسیدی کاسته شده و به تدریج جبهه قلیایی پدیدار می‌گردد. همان طور که ملاحظه می‌شود (شکل شماره ۹) ایجاد جبهه قلیایی برای آب مقطر در حدود فاصله ۱٦ سانتی‌متری و برای سایر محلولها در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از آند رخ می‌دهد که نشان دهنده تغییرات و کاهش جبهه اسیدی در مقایسه با آب مقطر است. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط بیابانکی و همکاران مطابقت دارد [25].

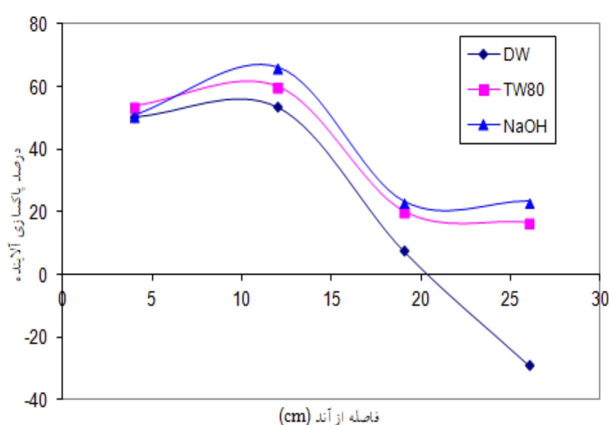


شکل ۹ pH خاک در پایان آزمایشهای مختلف

EC خاک. شکل شماره (۱۰) مقادیر EC اندازه‌گیری شده خاک را در مجاورت نقاط اندازه‌گیری pH (٤، ۱۲، ۱۹ و ۲٦ سانتی‌متر از آند) نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات EC در طول نمونه خاک برای محلولهای مختلف از روند مشابه و یکسانی پیروی نمی‌کند. بلکه بستگی به نوع محلول مورد استفاده دارد. مقدار EC برای آب مقطر در فاصله ٤ سانتی‌متر از آند برابر با ۱/٤۳ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و در فاصله ۲٦ سانتی‌متری ۲/٦٥ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که EC دارای روند افزایشی است. نتایج نشان می‌دهد که این تغییرات در این فواصل مختلف از طول نمونه خاک برای محلول NaOH ناچیز است. اما برای Tween80 در فاصله ٤ تا ۱۲ سانتی‌متری تغییرات صعودی است و بعد از آن از مقدار ثابتی برخوردار است. نتایج حاصل شده در مطالعه حاضر با نتایج لی و جیانگ در سال ۲۰۲۱ همخوانی داشته است [23].



شکل ۱۰ EC خاک در پایان آزمایشهای مختلف



شکل ۱۱ درصد آلاینده پاکسازی شده در پایان آزمایشهای مختلف

درصد آلاینده باقی‌مانده در خاک. از نتایج به دست آمده از دستگاه GC میزان درصد آلاینده باقی‌مانده یا پاکسازی شده از خاک را در فواصل مختلف از طول نمونه (٤، ١٢، ١٩ و ٢٦ سانتی‌متر از آند) تعیین گردید. نتایج حاصل از پاکسازی خاک رسی در شکل شماره (١١) نشان داده شده است. نتایج مربوط به محلولهای مختلف نشان می‌دهد که بیشترین درصد پاکسازی در اطراف آند رخ داده است و نیز با افزایش فاصله از آن مقدار آن کاسته می‌شود. برای محلول Tween80 در مجاورت آند درصد پاکسازی ٥٣/٨٨ درصد اما در مجاورت کاتد ١٦/٦٥ درصد می‌باشد. مقایسه نتایج محلول Tween80 و NaOH و آب مقطر نشان می‌دهد که درصد پاکسازی در نقاط مشخص از خاک برای آنها یکسان نمی‌باشد، به طوری که درصد پاکسازی در مجاورت کاتد معادل ٢٣/٣٦ درصد و ١٦/٦٥ درصد برای محلولهای NaOH و Tween80 می‌باشد، اما برای آب مقطر افزایش آلاینده در کاتد مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر فاصله از آند، نوع محلول مورد استفاده هم در پاکسازی نقش مهمی دارند. همان طوری که ملاحظه گردید هنگام استفاده از آب مقطر در اطراف کاتد پاکسازی صورت نپذیرفته است. سایچک و ردی [16] و استبرق و همکاران [22] نتایج مشابهی در خصوص پاکسازی یک خاک رسی آلوده به فانانترن و آنترانس گزارش کردند.

نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی پاکسازی و خواص مکانیکی یک خاک رسی آلوده به دی متیل فتالات با انجام آزمایشهای آزمایشگاهی و نیز کاربرد آب مقطر، محلول ۰/۱ مولار NaOH و محلول ۳ درصد Tween80 مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشها تحت ولتاژ و زمان ثابت انجام گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح ذیل خلاصه می‌گردد:

تغییرات PH و EC در مخازن آند و کاتد و نیز حجم مایع خروجی بستگی به محلول مورد استفاده در مخزن آند دارد. مقدار نهایی pH در آند برای محلولهای Tween80 و آب مقطر نسبت به محلول NaOH دارای کاهشی معادل ١٩/٨٥ و ٣٥/٨ درصد می‌باشد. مقدار EC هم در آند برای محلولهای Tween80 و NaOH کاهشی معادل ١٩/٨٥ و ١٨/١ درصد نسبت به آب مقطر دارا می‌باشد. حجم مایع خروجی برای محلول NaOH در حدود ۲۰ درصد بیشتر از سایر محلولها می‌باشد.

مقاومت برشی با افزایش فاصله از آند افزایش می‌یابد و مقدار آن در کاتد برای محلول NaOH در حدود ٥٠ و ٥٧ درصد بیشتر از محلولهای آب مقطر و Tween80 می‌باشد.

درصد پاکسازی خاک برای محلولهای مختلف یکسان نمی‌باشد و نیز درصد پاکسازی در کاتد نسبت به آند کاهش می‌یابد. برای محلولهای Tween80 و NaOH مقادیر آن در آند معادل ٥٣/٨٨ و ٥٠/٨ درصد است اما در مجاورت کاتد مقدار آن برای محلولهای مذکور ١٦/٦٥ و ٢٣/٣٦ درصد می‌باشد.

مراجع

[1] D. Reed, Structural adjustment, *the environment and sustainable development*. Routledge, 2013.

[2] Y. B. Acar, R. J. Gale, A. N. Alshawabkeh, R. E. Marks, S. Puppala, M. Bricka, and R. Parker, "Electrokinetic remediation: basics and technology status," *Journal of hazardous materials*, vol. 40, no. 2, pp. 117-137, 1995.

[3] H. D. Sharma, K. R. Reddy, *Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies*, John Wiley & Sons, 2004.

[4] A. Altaee, R. Smith, and S. Mikhalovsky, "The feasibility of decontamination of reduced saline sediments from copper using the electrokinetic process," *Journal of environmental management*, vol. 88, no. 4, pp. 1611-1618, 2008.

[5] S. Pamukcu, J. K. Wittle, "Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil," *Environmental Progress*, vol. 11, no. 3, pp. 241-50, 1992.

[6] K. R. Reddy, R. E. Saichek, "Enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from clay soil by periodic electric potential application," *Journal of Environmental Science and Health*, Part A, vol. 39, no. 5, pp. 1189-1212, 2004.

[7] H. S. Gibbs, "Soils and their utilization in the Wellington district," *InProc. NZ Soc*, *Soil Sci*, vol. 4, pp. 4-12, 1960.

[8] R. Hammett, *A study of the process involved in electroreclamation of contaminated soils*, MSc thesis, The University of Manchester, Manchester, UK, 1980.

[9] B. A. Segall, "Practical considerations in the use of electro-kinetics. InProceed- 746 ings of the Workshop Electro-kinetic Treat. Its Appl," *Environ.-Geotech. Engrg*, vol. 747, pp. 1-9, 1986.

[10] R. Lageman, W.Pool and G.Seffinga, "Electro-reclamation: theory and practice," *Chemistry and Industry*, vol. 18, pp. 585-590, 1989.

[11] C. J. Bruell, B. A. Segall, and M. T. Walsh, "Electroosomotic removal of gasoline hydrocarbons and TCE from clay," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 118, no. 1, pp. 68-83, 1992.

[12] S. Pamukcu, J. K. Wittle, D. L. Wise, And D. J. Trantolo, "Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils," pp. 245-298, 1994.

[13] A. P. Shapiro, R . F. Probstein, "Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis," *Environmental Science & Technology*, vol. 27, no. 2, pp. 283-91, 1993.

[14] Y. B. Acar, A. N. Alshawabkeh, "Principles of electrokinetic remediation," *Environmental science & technology*, vol. 27, no. 13, pp. 2638-47, 1993.

[15] F. Lancelot, H. Londiche, and G. De Marsily, "Experimental results on the influence of electric fields on the migration of oil, ionic species and water in porous media," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 67-74, 1990.

[16] R. E. Saichek, and K. R. Reddy, "Electrokinetically enhanced remediation of hydropHobic organic compounds in soils: a review," *Critical reviews in environmental science and technology*, vol. 35, no. 2, pp. 115-192, 2005.

[17] T. Alcántara, M. Pazos, S. Gouveia, C. Cameselle, and M. A. Sanromán, "Remediation of phenanthrene from contaminated kaolinite by electroremediation-Fenton technology," *Journal of Environmental Science and Health*,

part A, vol. 43, no. 8, pp. 901-906, 2008.

[18] H. Han, Y. J. Lee, S. H. Kim, and J. W. Yang, “Electrokinetic remediation of soil contaminated with diesel oil using EDTA–Cosolvent solutions,” *Separation Science and Technology*, vol. 44, no. 10, pp. 2437-2454, 2009.

[19] F. Ma, B. Wu, Q. Zhang, D. Cui, Q. Liu, C. Peng, F. Li And Q. Gu, “An innovative method for the solidification/stabilization of PAHs-contaminated soil using sulfonated oil,” *Journal of hazardous materials*, vol. 344, pp.742-748, 2018.

[20] A. R. Estabragh, A. T, Bordbar, F. Ghaziani, and A.A. Javadi, “Removal of MTBE from a clay soil using electrokinetic technique,” *Environmental Technology*, vol. 37, no. 14, pp. 1745-1756, 2016.

[21] W. Du, H. Zou, Y. C. Sun, R. Zhu, and G. S. Zhang, “Surfactant-enhanced electrokinetic remediation of chromium and phenanthrene cross-polluted soils,” *Environmental Engineering Science*, vol. 34, no. 12, pp. 908-916, 2017.

[22] A. R. Estabragh, M. Lahoori, A. A. Javadi, and J. Abdollahi, “Effect of a surfactant on enhancing efficiency of the electrokinetic method in removing anthracene from a clay soil,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 5, 2019.

[23] Y. Li, L. Jiang, “Comparison of the crude oil removal effects of different surfactants in electrokinetic remediation of low-permeability soil,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 105190, 2021.

[24] A. B. Fardin, A. J. Zanjani, and A. K. Darban, “Application of enhanced electrokinetic remediation by coupling surfactants for kerosene-contaminated soils: Effect of ionic and nonionic surfactants,” *Journal of Environmental Management*, vol. 277, no. 1, pp. 111422, 2021.

[25] F.Biabanaki, J. Neshati, and M. Ehteshami, “Using the electrokinetic remediation (EKR) technique for the soil remediation from the contaminants,” *Geosystem Engineering*, pp. 1-9, 2022.

[26] B. Gidudu, E. M. Chirwa, “The Role of pH, Electrodes, Surfactants, and Electrolytes in Electrokinetic Remediation of Contaminated Soil,” *Molecules*, vol. 27, no. 21, pp. 7381, 2022.

[27] P. Ventrice, D. Ventrice, E. Russo, and G. De Sarro, “Phthalates: European regulation, chemistry, pharmacokinetic and related toxicity,” *Environmental toxicology and pharmacology*, vol. 36, no. 1, pp. 88-96, 2013.

[28] J. Yang, Y. Li, Y. Wang, J. Ruan, J. Zhang, and C. Sun, “Recent advances in analysis of phthalate esters in foods,” *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 72, pp. 10-26, 2015.

[29] M. Mostafa Lu, F. Shariati, and S. Shariati, “Investigation of phthalates in Anzali lagoon sediments, Iran,” *Wetland Ecobiology Journal*, vol. 10, no. 37, pp. 37-47, 2017. (in persian).

[30] C.S. Jeon, J. S. Yang, K. J. Kim, and K. Baek, “Electrokinetic removal of petroleum hydrocarbon from residual clayey soil following a washing process,” *CLEAN–Soil, Air, Water*, vol. 38, no. 2, pp.189-193, 2010.

[31] A. R. Estabragh, A. T. Bordbar, And A. A. Javadi, “Effect of Quality Electrolyte Fluid on Removing MTBE from a Clay Soil Using Electrokinetic Technique,” *American Society of Civil Engineers*, vol. 144, 2018.

[32] J. G. Hunter, CG. Uchrin, “Adsorption of pHthalate esters on soil at near saturation conditions,” *Journal of Environmental Science & Health*, Part A, vol. 35, no. 9, pp. 1503-1515, 2000.

[33] J. K. Mitchell, K. Soga, *Fundamentals of soil behavior*, New York: John Wiley & Sons, pp. 280-304, 2005.

[34] EPA (U.S. Environmental Protection Agency), *Phthalate Esters By Gas Chromatography With Electron Capture*

Detection (GC/ECD), Washington, D.C, 1996.

[35] A. Rittirong, R. S. Douglas, J. Q. Shang, and E. C. Lee, "Electrokinetic improvement of soft clay using electrical vertical drains," *Geosynthetics International*, vol. 15, no. 5, pp. 369-81, 2008.

[36] A. R. Estabragh, M. Naseh, and A. A. Javadi, "Improvement of clay soil by electro-osmosis technique," *Applied Clay Science*, vol. 95, pp. 32-36, 2014.